

PID 控制参数的整定方法

陈传硕* 田丽华

(长春邮电学院函授部 长春 130012)

摘 要

在分析常用的 PID (比例积分微分) 控制器控制参数的整定方法 (扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、模型识别法) 的同时, 给出了其中几种方法的操作步骤。用微机对典型对象进行实验研究, 通过改变被控对象的参数, 分别研究了用上述三种方法整定控制器参数的适应能力。提出了用模型识别法确定控制器整定参数的规则, 给出了识别系统特征参数的方法。实验结果表明, 模型识别法参数调整方便, 适应能力强, 应用范围广, 较其他方法控制效果优越。

关键词 控制方法 过程控制 控制系统理论/PID 控制

中图分类号 TP13 TP18

1 前言

随着计算机技术的发展, 控制器的方案也在不断丰富、完善, 尽管当前已有许多先进的控制方案, 但 PID (比例积分微分) 控制算法在工业控制中经历了几十年的变迁, 目前仍被广泛采用, 其原因在于:

PID 控制器的鲁棒性好^[1,2], 不须清楚了解有关对象的数学模型;

这种控制规律已从理论上被证明, 对于过程特性为

$$\frac{Ke^{-T_d s}}{TS+1} \text{ 或 } \frac{Ke^{-T_d s}}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$$

的受控对象, PID 算法是一种常规控制算法;

此算法的各个参数相互独立, 因此调整简单, 且操作人员对参数的物理概念易于理解, 其操作经验可以直接用来调整参数;

算法简单, 计算量小, 易实现多回路控制。

为此, 本文研究了 PID 控制算法。所谓 PID 控制, 就是比例 (Proportional) 加积分 (Integral) 加微分 (Differential) 控制。

收稿日期: 1994 01 07

* 男 1945 年生 副教授

2 具有 PID 控制器结构的控制系统

控制系统的结构如图 1 所示。

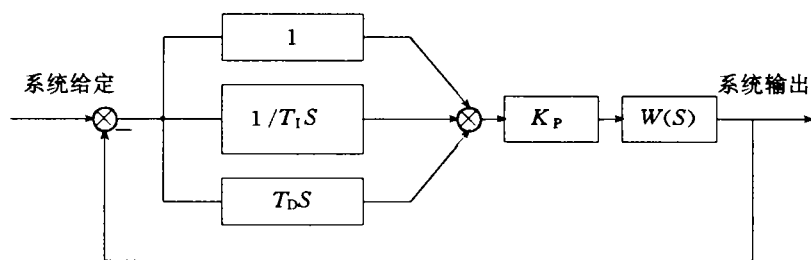


图1 控制系统结构图

图 1 中被控对象的传递函数为

$$W(S) = \frac{Ke^{-LS}}{(S+1)(S+2)} \quad (1)$$

式 (1) 中, K 为系统放大系数, L 为系统纯迟后时间常数。

PID 控制器的传递函数

$$W_{PID}(S) = K_P(1 + T_D S + \frac{1}{T_I S}) \quad (2)$$

式 (2) 中, K_P 为比例系数; T_D 为微分时间常数; T_I 为积分时间常数。

控制系统的闭环传递函数

$$W_B(S) = \frac{b_1 S^3 + b_2 S^2 + b_3 S + b_4}{S^4 + a_1 S^3 + a_2 S^2 + a_3 S + a_4} \quad (3)$$

式 (3) 中

$$\begin{aligned} a_1 &= 3 + 1/L - KK_P T_D & b_1 &= -KK_P T_D \\ a_2 &= 3/L + 2 + KK_P T_D/L - KK_P & b_2 &= KK_P T_D/L - KK_P \\ a_3 &= 2/L + KK_P/L - KK_P/T_I & b_3 &= KK_P/L - KK_P/T_I \\ a_4 &= KK_P/T_I/L & b_4 &= KK_P/T_I/L \end{aligned}$$

3 PID 控制参数的选择

PID 控制是应用最广泛的一种控制规律。当比例控制作用加大时, 系统动作灵敏, 速度加快; 作用偏大时, 振荡次数增多, 调节时间加长; 但控制作用太大时, 系统将不稳定, 控制作用太小时, 又会使系统动作缓慢。在系统稳定的情况下, 加大比例控制, 可以减少稳态误差, 提高控制精度, 但不能完全消除稳态误差。积分控制使系统的稳定性下降, 能消除系统的稳态误差, 提高控制系统的控制精度; 微分控制可以改善系统的动态特性 (如超调量减少, 调节时间缩短), 使系统稳态误差减少, 提高控制精度。

3.1 扩充临界比例度法选 PID 控制器的控制参数

扩充临界比例度法^[3]适用于有自平衡能力的被控对象, 不需确定对象的数学模型。

首先将控制器选为纯比例控制，从小到大改变此比例系数 K_P ，直到系统的阶跃响应持续 4~5 次振荡为止。此时，认为系统已达到临界振荡状态。记此时比例系数为临界比例系数 K_r ，从第一个振荡顶点到第二个振荡顶点时间为振荡周期 T_r ，然后根据表 1 列举的 Ziegler-Nichols 经验公式确定 PID 控制器的控制参数。

表 1 扩充临界比例法选 PID 控制器参数

控制度	控制规律	T/T_r	K_P/K_r	T_I/T_r	T_D/T_r
1.05	PI	0.030	0.55	0.88	
	PID	0.140	0.63	0.49	0.140
1.20	PI	0.050	0.49	0.91	
	PID	0.043	0.47	0.47	0.160
1.50	PI	0.140	0.42	0.99	
	PID	0.090	0.34	0.43	0.200
2.00	PI	0.220	0.36	1.05	
	PID	0.160	0.27	0.40	0.220
Ziegler-Nichols 整定参数	PI		0.45	0.83	
	PID		0.60	0.50	0.125

由此法得到的模拟控制器的整定参数对数字 PID 调节器原则上也是适用的，但对数字 PID 控制，这种方法已得到扩充，即扩充临界比例度法。

应用扩充临界比例度法时，首先要确定控制度

$$\text{控制度} = \frac{\left[\int_0^\infty e^2 dt \right]_D}{\left[\int_0^\infty e^2 dt \right]_A} \tag{4}$$

控制法以误差平方积作为评价函数，反映了数字控制的控制效果对模拟控制的控制效果的相当程度。通常，当控制度为 1.05 时，数字控制的控制效果与模拟控制的控制效果相当；当控制度为 2 时，数字控制较模拟控制的控制质量差一倍。用扩充临界比例度法选 PID 参数整定步骤为：

- a 选择合适的采样周期 T ，调节器作纯比例控制；
- b 逐渐加大比例系数 K_P ，使控制系统出现临界振荡状态，由临界振荡过程求得相应的临界振荡周期 T_r ，并记下临界振荡增益 K_r ；
- c 选择控制度；
- d 选好控制度后，按表 1 选采样周期及 PID 控制器的参数；
- e 按求得的整定参数运行，观察控制效果，再适当调整参数，直到获得比较满意的控制效果。

3.2 扩充响应曲线法选 PID 控制器参数

应用扩充响应曲线法时，要预先在对象动态响应曲线上求出等效纯滞后时间常数

T_{d1} 和等效滞后时间常数 T_1 及它们的比值 T_{d1}/T_1 . 其余步骤和扩充临界比例法相似。由表 2 可求得扩充响应曲线法选 PID 控制器参数的关系式。

表 2 扩充响应曲线法选 PID 控制器参数

控制度	控制规律	T/T_{d1}	$K_P/T_1/T_{d1}$	T_1/T_{d1}	T_D/T_{d1}
1.05	PI	0.10	0.84	3.40	
	PID	0.05	1.15	2.00	0.45
1.20	PI	0.20	0.73	3.60	
	PID	0.16	1.00	1.90	0.55
1.50	PI	0.50	0.68	3.90	
	PID	0.34	0.85	1.62	0.65
2.00	PI	0.80	0.57	4.20	
	PID	0.60	0.60	1.50	0.85
Ziegler-Nichols 整 定	PI		0.90	3.30	
	PID		1.20	3.00	0.50

3.3 PID 归一参数整定法

控制器参数的整定是一项烦琐而又费时的工作，当一台计算机控制数十乃至数百个控制回路时，整定参数是十分浩繁的工作。对此，PID 归一整定法是一种简单的整定法。

设 PID 增量式为

$$\begin{aligned} \Delta u(KT) &= K_P\{[e(KT) - e(KT - T)] + T/T_1[e(KT)] \\ &\quad + T_D/T[e(KT) - 2e(KT - T) + e(KT - 2T)]]\} \\ &= K_P[(1 + T/T_1 + T_D/T)e(KT) - (1 + 2T_D/T)e(KT - T) \\ &\quad + (T_D/T)e(KT - 2T)] \end{aligned} \tag{5}$$

式中 T 为采样周期， T_1 为积分时间常数， T_D 为微分时间常数， e 为误差。令

$$\begin{aligned} c_0 &= 1 + T/T_1 + T_D/T \\ c_1 &= -(1 + 2T_D/T) \\ c_2 &= T_D/T \end{aligned}$$

则式 (5) 可简化为

$$\Delta u(KT) = K_P[c_0e(KT) + c_1e(KT - T) + c_2e(KT - 2T)] \tag{6}$$

要进行 PID 控制器参数的整定，就要确定 T 、 K_P 、 T_1 和 T_D 四个参数。为了减少在线整定参数的数目，人为假设约束条件，以减少独立变量的个数。如取

$$T = 0.1T_r, \quad T_1 = 0.5T_r, \quad T_D = 0.125T_r, \tag{7}$$

式中 T_r 为纯比例控制时的临界振荡周期。将式 (7) 代入方程 (5) 得

$$\Delta u(KT) = K_P[2.45e(KT) - 3.5e(KT - T) + 1.25e(KT - 2T)] \tag{8}$$

从式 (8) 不难看出, 对四个参数的整定简化成了对一个参数的整定, 问题明显简化了。

3.4 模型识别法确定 PID 整定参数

模型识别法^[4]的主要特点是不需要建立系统的数学模型, 只需识别系统误差相对于时间的响应形状, 信息用衰减率 (DAM), 超调量 (OVR) 和周期 (T) 表示。利用测得的系统的信息及系统性能指标的要求, 将操作者整定的经验、技巧归纳为一系列整定规则, 建立知识库实现智能控制。系统根据上述信息可自动确定控制器整定参数。

用图 1 所示系统对模型识别法进行仿真实验的结果表明, T_i/T_D 比值为 4 时是较理想的, 此值对线性系统、纯滞后系统均可获得较满意的控制效果。

对以滞后为主的控制系统, T_i/T 比值在一定范围内越大, 系统性能越好, 系统收敛快, 峰值误差小, 调节时间短, 积分绝对误差小。但当 T_i/T 比值太大时, 系统性能明显下降。

对纯滞后为主的过程, 在一定范围内 T_i/T 越小系统性能越好, 但当 T_i/T 太小时, 系统性能明显下降, 甚至出现增幅振荡。

当干扰使系统的误差相对于时间的响应曲线发生变化后, T_i 和 T_D 的值按上述规律进行调整, 比例系数 K_p 根据第一峰值的高度及系统的衰减率和最大允许的衰减率的差进行调整; 当峰值信息明显, 且衰减率大于最大允许值时, 则适当增加比例系数; 反之则适当减小比例系数。经上述整定后, 系统的峰值误差仍不能满足要求, 则利用积分分离的 PID 控制可使其降低。

4 系统特征参数的确定

用响应曲线法和模型识别法进行 PID 参数的整定时, 需确定系统的有效纯滞后时间常数 T_{d1} 和系统的有效滞后时间常数 T_1 及比值 T_{d1}/T_1 。

给出 PID 控制器的初值 K_p 和 T_{i1} , 测出此时的衰减率 DAM1 和周期 T, 然后保持比例系数 K_p 而积分给定为

$$T_{i2}=0.37T$$

测出在此条件下的衰减率 DAM2 和周期 T_2 。根据 DAM1/DAM2 比值, 即可确定 T_{d1}/T_1 的比值。其关系曲线如图 2 所示。

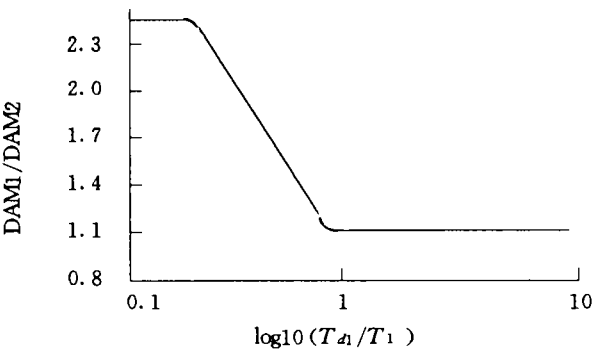


图2 衰减比与 T_{d1}/T_1 关系曲线

5 仿真实验及结果

用图 1 控制系统, 在 IBM-PC 机上用 BASIC 语言作仿真实验。当系统稳定后, 系统的放大系数 K 及系统的纯滞后时间常数 L 按表 3 规律变化后, 系统重新启动, 用不

同的控制算法分别对系统进行控制。

5.1 用临界比例度法选控制器的控制参数

用临界比例度法选 PID 控制器的控制参数时，所用的比例系数 K_P 、微分时间常数 T_I 、积分时间常数 T_D 的数值及此时系统的响应信息如表 4 所示。

表 3 系统参数的变化

条件	K	L (s)
①	4	0.1
②	6	0.1
③	8	0.1
④	6	0.2
⑤	8	0.2

表 4 临界比例度法控制时系统有关参数

条件	K_P	T_I (s)	T_D (s)	T_s (s)	OVR	DAM	ERR (℃)
①	2.580	0.8	0.200	3.8	0.30	0.30	0.45
②	1.710	0.8	0.200	3.8	0.30	0.30	0.45
③	1.284	0.8	0.200	3.8	0.30	0.30	0.45
④	0.960	1.1	0.275	4.0	0.21	0.17	0.35
⑤	0.720	1.1	0.275	4.0	0.21	0.17	0.35

表中的 DAM 是系统衰减率，OVR 是系统超调量， T_s 是稳定误差为 0.02 时的调节时间，ERR 是系统所能达到的最大误差。此时系统响应曲线如图 3 所示。

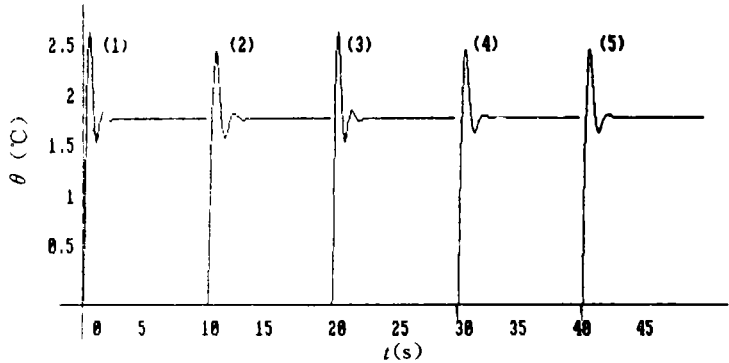


图 3 用临界比例度法控制时系统输出曲线

5.2 用响应曲线法选控制器的控制参数

此时系统的控制参数及系统的响应信息如表 5 所示。

表 5 响应曲线法控制时系统有关参数

条件	K_P	T_I (s)	T_D (s)	ERR (℃)	OVR	DAM
①	0.12	0.2	0.04	0.70	0.65	0.70
②	0.12	0.2	0.04	0.80	0.85	0.87
③	0.12	0.2	0.04	1.50	0.99	1.00
④	0.24	0.4	0.08	0.85	0.89	0.90
⑤	1.24	0.4	0.08	2.00	0.99	1.20

系统输出曲线如图 4 所示。

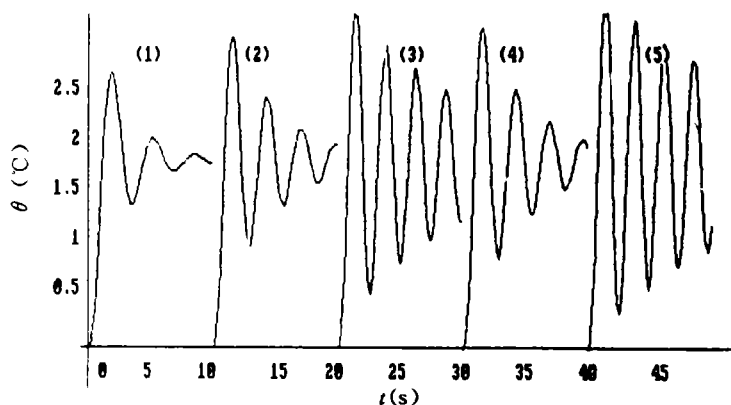


图 4 用响应曲线法控制时系统输出曲线

5.3 用模型识别法选控制器的控制参数

当系统参数发生变化时,根据测得的变化自动选择 PID 控制器的控制参数,直到获得满意的输出响应曲线。系统输出曲线如图 5 所示,有关参数如表 6 所示。

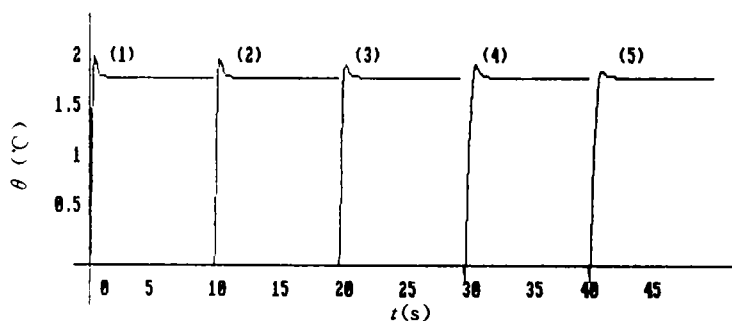


图 5 用模型识别法控制时系统输出曲线

表 6 模型识别法控制时系统有关参数

条件	K_P	T_I (s)	T_D (s)	T_S (s)	OVR	DAM	ERR (°C)
①	2.3	1.30	0.325	2.4	0	0	0.15
②	1.5	1.30	0.325	2.2	0	0	0.08
③	1.0	1.32	0.330	1.2	0	0	0.13
④	0.7	1.40	0.350	1.2	0	0	0.10
⑤	0.5	1.44	0.360	1.2	0	0	0.19

5.4 结论

由三个实验曲线及实验得出的有关数据可知,当系统特性参数发生变化,尤其是在条件变坏的情况下,模型识别法的控制效果明显优于临界比例度法和响应曲线法的控

制效果。模型识别法参数调整方便,适应能力强,应用范围广,程序易于模块化。

参 考 文 献

- 1 郑冰,王诗宓. PID 控制系统的鲁棒性分析与设计. 信息与控制, 1989 (6): 15~18
- 2 瞿刚. 一种智能鲁棒控制算法. 信息与控制, 1989 (1): 52~58
- 3 叶兆春,王发庆. 一种基于规则的 PID 参数自整定. 北京工业大学学报, 1987 (3): 1~7
- 4 Kraus T W, Myron T T. Self-tuning PID controller uses pattern recognition approach. Control engineering, 1984, 33 (6): 106~111

Tuning method of PID parameter-control

Chen Chuanshuo Tian Lihua

(Dept. of Correspondence, Changchun Post and Telecommun. Inst., Changchun, China 130012)

ABSTRACT

In the midst of analyzing the tuning method of conventional PID controllers' parameter-control, operation steps of some control algorithm are given. Three methods under consideration are: expanded critical proportion band method, expanded response curved line method and pattern recognition approach. With the help of microcomputer, simulation experiment to typical object is taken. Through changing the parameter of the controlled object, the adaptive capability of the controller's parameter tuning with the above mentioned three methods is studied respectively. Rules to determine controller's tuning parameter by pattern recognition approach is proposed. The method to distinguish system characteristic parameter is given. Experiment result shows that the pattern recognition approach has the merits of convenient adjusting, strong adaptive capability, wide-ranging application and its controlling effect is better.

Keywords: control methods; process control; control system theory; PID control